



АХОНІН

Сергій Володимирович — академік НАН України, доктор технічних наук, професор, заступник директора з наукової роботи Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ТА ЗВАРЮВАННЯ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ НОВОГО ПОКОЛІННЯ ДЛЯ ПОТРЕБ ОБОРОНИ ТА МЕДИЦИНИ

**Стенограма доповіді на засіданні
Президії НАН України 19 листопада 2025 року**

У доповіді наведено актуальні й важливі результати багаторічних фундаментальних досліджень і прикладних робіт, проведених фахівцями Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України в галузі електронно-променевих технологій, зокрема адитивного виробництва. Обговорено перспективи широкого практичного застосування розроблених електронно-променевих технологій одержання та зварювання титанових сплавів нового покоління для потреб підприємств авіаційної галузі, а також сфери оборони та медичних застосувань.

Шановний Анатолію Глібовичу!

Шановні члени Президії!

Сучасний технологічний прогрес значною мірою пов'язаний із впровадженням новітніх конструкційних матеріалів з високими експлуатаційними властивостями, до яких, безумовно, належать титан та сплави на його основі.

Сфера застосування титанових сплавів на сьогодні дуже широка. Вони є базовими конструкційними матеріалами для виготовлення високонавантажених вузлів та агрегатів в авіаційній галузі, відповідальних виробів ракетно-космічної техніки, газотурбінних двигунів, конструктивних елементів літальних апаратів та бронезахисту бойових машин і особового складу, деталей пневмосистем, дисків коліс, пружин, ресор у транспортному машинобудуванні, біомедичних імплантатів тощо. Україна є однією з небагатьох країн світу, які мають повний цикл виробництва титану: від видобутку титановмісних руд, їх збагачення і виробництва губчастого титану до виплавлення зливків титанових сплавів і виготовлення титанових напівфабрикатів.

Підвищення вимог до техніко-економічної ефективності експлуатації машин і механізмів зумовлює необхідність створення

нових титанових сплавів та зварних конструкцій з них, які здатні витримувати великі навантаження за екстремальних умов роботи. Тому в провідних матеріалознавчих центрах розвинених країн світу інтенсивно проводять роботи щодо створення нових титанових сплавів із підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Електронно-променеві технології є дуже важливими як для створення нових поколінь титанових сплавів, забезпечуючи високу чистоту, однорідність та міцність матеріалів, так і для їх зварювання, оскільки дають змогу отримувати глибоке проплавлення та вузький шов із мінімальними деформаціями.

Науковці Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України впродовж багатьох років виконують фундаментальні і прикладні дослідження в галузі електронно-променевих технологій, зокрема адитивного виробництва, розробляють відповідні методики та спеціалізоване обладнання (рис. 1).

Так, з використанням складнолегованих та економнолегованих композицій створено низку нових титанових сплавів із підвищеними експлуатаційними характеристиками. Зокрема, це високоміцні складнолеговані титанові сплави T110 (Ti-5Al-1Mo-1V-4Nb-2Fe-0,5Zr) і T120 (Ti-5Al-3Mo-2V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr), властивості яких поєднують високі характеристики міцності й пластичності: межа їхньої міцності становить 1100 і 1200 МПа відповідно, а відносне подовження — не менш як 12—15 %. Ці сплави використовують на практиці для виготовлення бронезахисних елементів у конструкціях літальних апаратів.

За допомогою методів математичного моделювання теплових та гідродинамічних процесів, що відбуваються в зливках титанових сплавів під час електронно-променевого плавлення, встановлено основні закономірності формування дрібнокристалічної структури металу та визначено шляхи керування процесами формування структури під час кристалізації зливка при нагріванні поверхні розплаву електронними променями.

Побудовано математичну модель процесу випаровування при електронно-променевому



Рис. 1. Універсальна промислова електронно-променева установка UE5812. ДП «НВЦ «Титан» ІЕЗ ім. Є.О. Патона»



Рис. 2. Зливки сплаву алюмінію-титану і його макроструктура

плавленням, яка встановлює залежність концентрації легувальних компонентів у зливку від технологічних параметрів плавки та концентрації легувальних домішок у витратній заготовці.

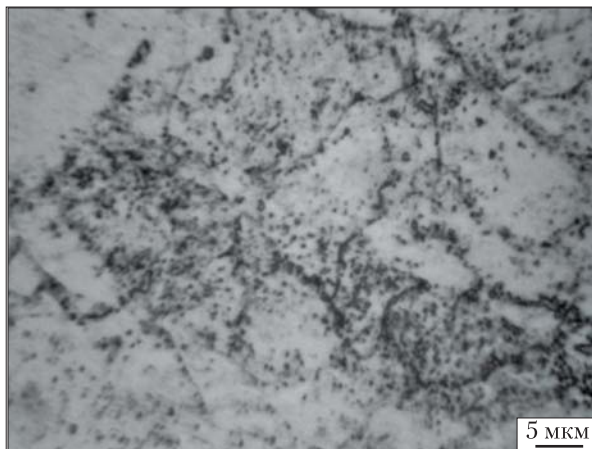


Рис. 3. Мікроструктура металу шва титанового псевдо- β -сплаву ВТ19 після електронно-променевого зварювання з попереднім нагріванням до 400 °С і лазерною термічною обробкою

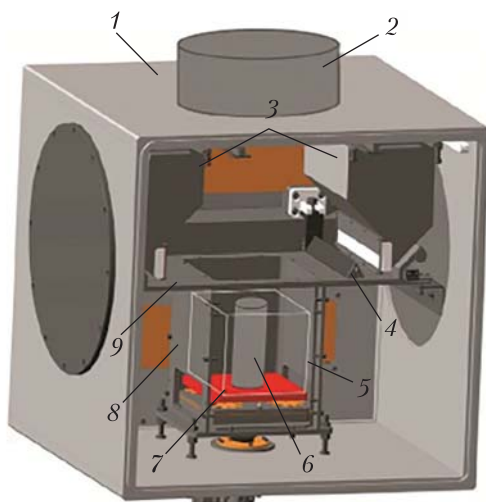


Рис. 4. Установка для електронно-променевого 3D-друку: 1 — вакуумна камера; 2 — електронно-променева гармата; 3 — бункери; 4 — рейка; 5 — спечений порошок; 6 — виріб; 7 — платформа; 8 — шахта; 9 — стіл

За результатами фундаментальних досліджень процесів кристалізації та випаровування елементів із розплаву титану у вакуумі при нагріванні поверхні електронним променем розроблено технології електронно-променевого плавлення титанових сплавів нового покоління, зокрема сплавів на основі інтермета-

лідів титану (рис. 2), що дає змогу одержувати зливки із гарантованим хімічним складом та вмістом домішок.

Для високоміцних та жароміцних титанових сплавів нового покоління, отриманих методом електронно-променевого плавлення, відпрацьовано технологічні процеси гарячої деформаційної обробки. Встановлено оптимальні технологічні параметри кування і прокатування, які забезпечують високу якість отриманих заготовок. Одержано напівфабрикати у вигляді пластин і прутків, механічні властивості яких характеризуються підвищеною пластичністю, але параметри міцності при цьому зберігаються на необхідному рівні. Макро- і мікроструктура деформованого за розробленими технологіями металу повністю відповідає галузевим вимогам промисловості до таких напівфабрикатів.

Дослідно-промислову перевірку створених електронно-променевих технологій отримання нових високоміцних та жароміцних титанових сплавів проводили на Державному підприємстві «Науково-виробничий центр «Титан» Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України» за замовленням промислових підприємств України.

Важливим чинником, що впливає на можливість застосування титанових сплавів для виготовлення кінцевих виробів, є їхня здатність до зварювання. Переважну більшість конструкцій із титанових сплавів виготовляють за допомогою технологій електронно-променевого та аргондугового зварювання. Термічний цикл зварювання приводить до істотної зміни структур колошовної зони і металу шва високолегованих сплавів і утворення метастабільних фаз, що погіршує механічні характеристики зварного з'єднання. Тому було проведено дослідження здатності до зварювання низки титанових сплавів нового покоління та визначено технологічні режими електронно-променевого зварювання, які забезпечують оптимальний фазовий склад металу шва і зони термічного впливу, а також спеціальні режими їх термічної обробки для досягнення високих механічних властивостей зварних з'єднань.

Зокрема, було з'ясовано, що зварювання високоміцного титанового сплаву T120 доцільно виконувати електронно-променевим методом з подальшим післязварювальним відпалом за температури 900 °C, в результаті чого в металі шва формується внутрішньозеренна структура із задовільними значеннями ударної в'язкості та відносного подовження.

Для титанового псевдо- β -сплаву BT19 (Ti-3Al-5,5Mo-3,5V-4,5Cr-1Zr) встановлено можливість регулювання співвідношення між α - і β -фазами в металі шва і в зоні термічного впливу. Електронно-променеве зварювання в поєднанні з попереднім нагріванням до температури 400 °C і лазерною термічною обробкою дозволяє знизити вміст β -фази в металі шва сплаву BT19 з 91 до 53 %, що підвищує міцність зварних з'єднань (рис. 3).

Окремий напрям робіт в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України пов'язаний із розвитком адитивних електронно-променевих технологій (технологій 3D-друку). Розроблено технологію та створено устаткування для електронно-променевого 3D-друку виробів із новітніх високоміцних сплавів титану (рис. 4). Відпрацьовано повний цикл виготовлення виробів, який включає автоматизовану обробку креслень, сформованих у програмному середовищі автоматизованого проектування, побудову цифрової моделі виробу з технологічними опорами, її оптимізацію з урахуванням залишкових деформацій, що виникають у процесі друку, та безпосередньо електронно-променевий друк виробу.

Для практичної реалізації розробленої адитивної технології створено відповідне програмне забезпечення та виготовлено спеціалізоване обладнання, на якому на замовлення українських підприємств авіаційної промис-

ловості і турбінобудування створено оптимізовані цифрові моделі роторних лопаток газотурбінних двигунів та окремих компонентів малорозмірних авіаційних двигунів. Методом електронно-променевого 3D-друку з титанового сплаву TA15 виготовлено дослідні партії цих виробів.

Експериментальні дослідження показали, що адитивні електронно-променеві технології дають змогу виробляти деталі з контрольованою мікроструктурою та високими механічними характеристиками, зокрема забезпечують підвищену втомну довговічність виробів, що є критично важливим для авіаційної техніки.

Аналогічний підхід було застосовано для створення індивідуальних медичних імплантатів, зокрема ендопротезів кульшових суглобів, щелепно-лицьових імплантатів, імплантатів для реконструкції дефектів кісток кінцівок. У співпраці з військовими хірургами за даними комп'ютерної томографії пацієнтів розроблено цифрові моделі різних імплантатів пошкоджених кісток і методом електронно-променевого 3D-друку з порошку титанового сплаву TA15 виготовлено відповідні зразки.

Отже, результати виконаних в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України фундаментальних досліджень і прикладних робіт доводять, що електронно-променеві технології плавлення, зварювання та 3D-друку є актуальними й ефективними методами створення титанових сплавів нового покоління і виробів з них. Розроблені підходи мають значний потенціал для впровадження у промисловість, що сприятиме зміцненню обороноздатності держави, розвитку сучасної медичної інженерії та створенню науково-технологічного підґрунтя для повоєнного відновлення титанової галузі України.

Дякую за увагу!

Serhii V. Akhonin

Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7746-2946>

ELECTRON BEAM TECHNOLOGIES FOR PRODUCING AND WELDING
NEW GENERATION TITANIUM ALLOYS FOR DEFENSE AND MEDICAL NEEDS

Transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, November 19, 2025

The report presents relevant and important results of many years of fundamental research and applied work conducted by the Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine in the field of electron beam technologies, in particular additive manufacturing. The prospects for the wide practical application of the developed electron beam technologies for the production and welding of new generation titanium alloys for the needs of aviation industry enterprises, as well as for the defense and medical applications, are discussed.

Cite this article: Akhonin S.V. Electron beam technologies for producing and welding new generation titanium alloys for defense and medical needs (transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, November 19, 2025). *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2026. (1): 54—58. <https://doi.org/10.15407/visn2026.01.054>